

감육된 탄소강배관의 변형과 파괴거동

안석환* · 남기우***

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 신소재공학부

Deformation and Fracture Behavior of Wall Thinned Carbon Steel Pipes

SEOK-HWAN AHN* AND KI-WOO NAM***

*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

***Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Wall thinning 감육, Carbon steel pipe 탄소강배관, Erosion/Corrosion 침식/부식, Finite element analysis 유한요소해석, Bending load 굽힘하중, Fracture behavior 파괴거동, Failure mode 손상모드

ABSTRACT: Monotonic four-point bending tests were conducted on straight pipe specimens, 102 mm in diameter with local wall thinning, in order to investigate the effects of the depth, shape, and location of wall thinning on the deformation and failure behavior of pipes. The local wall thinning simulated natural erosion/corrosion metal loss. The deformation and fracture behavior of the straight pipes with local wall thinning was compared with that of non wall-thinning pipes. The failure modes were classified as local buckling, ovalization, or crack initiation, depending on the depth, shape, and location of the local wall thinning. Three-dimensional elasto-plastic analyses were carried out using the finite element method. The deformation and failure behavior, simulated by finite element analyses, coincided with the experimental results.

1. 서 론

탄소강배관은 에너지관련 플랜트의 배관시스템에서 주요기 중의 하나로 폭넓게 사용되고 있다. 플랜트의 사용기간 동안 고온 고압수와 고온증기가 이들 배관시스템을 통해 고속으로 흐른다.

때때로 이들 배관에는 침식-부식(Erosion-corrosion)에 의해 내부 벽에 감육이 발생한다 (Virginia Electric and Power Co., 1987). 그러므로 배관시스템의 보전을 유지하기 위해서 국부감육을 가지는 배관의 강도를 평가하는 것은 중요하다. 최근까지 감육을 가지는 배관에 대한 소성붕괴거동과 강도평가에 대한 몇몇 실험적 연구들이 행하여져 왔다(안석환 등, 2002; Ahn et al., 1998, 2002; Japan Atomic Energy Research Institutes, 1997; Kim et al., 2002; Son et al., 2004; Miyazaki et al., 1999). 그러나, 감육의 적용 가능한 정도는 아직 정립되어 있지 않다(ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III., 1992; ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI., 1998).

본 연구에서는 변형과 파괴거동에 미치는 감육의 깊이, 형상 및 위치의 영향을 조사하기 위해서 감육결합이 가공된 직경 102mm의 직관 시험편을 사용하여 정적으로 4점굽힘시험을 행하였다. 감육을 가지는 직관의 변형과 파괴거동은 감육이 없는 건전한 배관과 비교되었다. 또한, 감육을 가지는 배관의 파괴거

동 평가의 적용성을 확립하기 위하여 탄소성 유한요소해석을 행하였다.

2. 재료, 실험 및 해석방법

2.1 재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 고압탄소강배관(Carbon steel pipes for high pressure service) STS370(JIS 규격)이다. Table 1과 2에 기계적 성질과 화학 성분을 각각 나타내었다. 사실, 감육의 문제는 배관의 내부에서 발생한다. 그러나 가공상의 어려움으로 본 연구에서는 배관 외부에 감육결합을 가공하였는데, 이것은 내부

Table 1 Mechanical properties

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongation
	σ_u [MPa]	σ_y [MPa]	[%]
STS370	402	273	28

Table 2 Chemical composition [wt%]

Material	C	Si	Mn	P	S
STS370	0.25	0.17	0.5	0.035	0.035

교신저자 남기우: 부산시 남구 용당동 산 100

051-620-1640 namkw@pknu.ac.kr

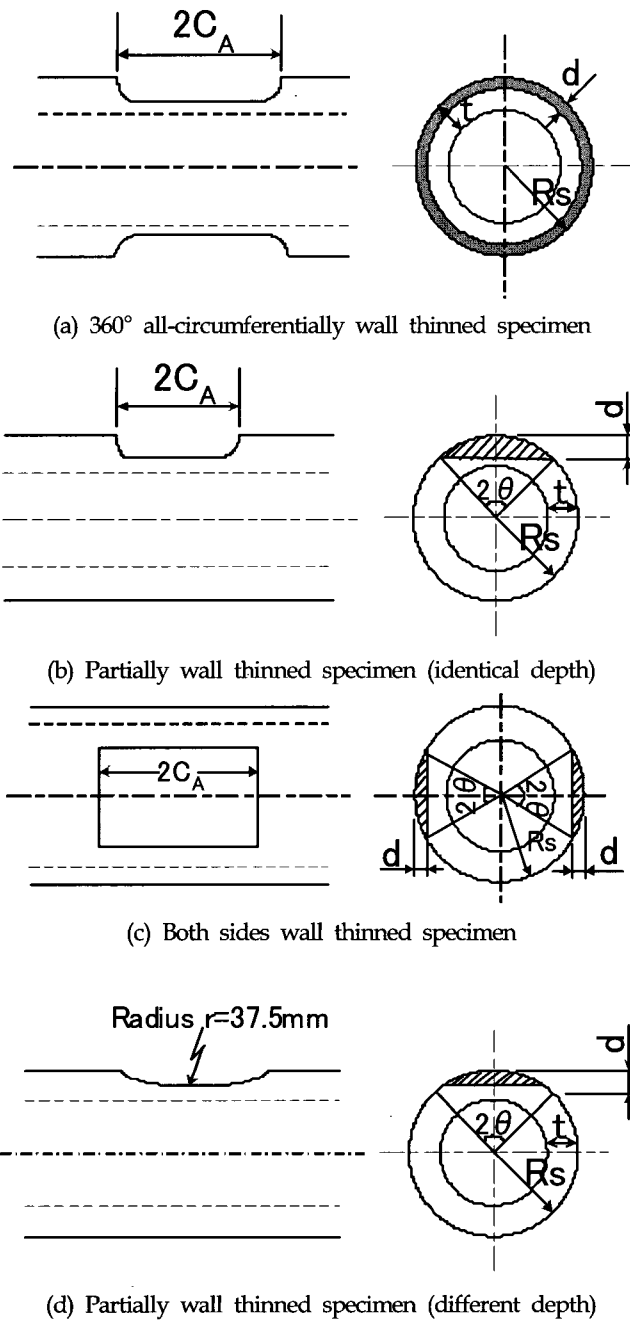


Fig. 1 Configurations of local wall thinning

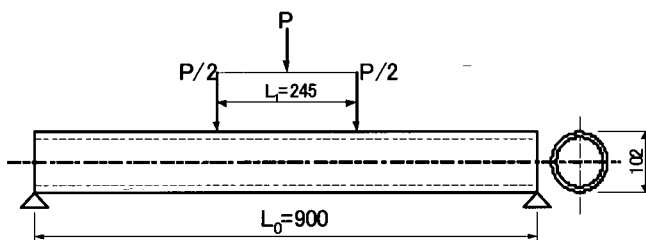


Fig. 2 Shape of pipes and dimensions in mm

에 감육결합을 상정한 배관의 변형 및 파괴거동의 결과와 유사하다는 보고에 따른 것이다(Ahn et al, 2002; Miyazaki et al., 1999).

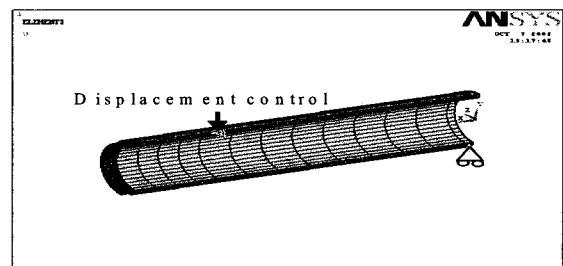
실제 배관에서 발생하는 감육의 형태나 크기는 불규칙할 것이며 여러 가지 형상을 가질 것이다. 이에 냉각수 유동에 따른 예상 가능한 감육형상의 몇 가지를 직배관의 원주방향과 축방향으로 크기가 다르게 배관 외부에 기계적으로 모의 가공하였다. 감육배관의 4가지 타입이 설정되었고, 그것을 Fig. 1(a)~(d)에 나타내었다. Table 3에는 감육의 크기를 정리하여 나타내었다. 특히 (b)와 (d)는 하중 부하방향에 대해서 감육결합이 인장축과 압축축에 각각 오도록 위치시켰다. (c)의 경우는 편평화(Ovalization) 파괴를 조장하기 위하여 하중 부하방향에 대하여 중립축의 양측에 감육결합을 가공하였다.

단조 4점 굽힘하중이 실은 대기 중에서 감육배관시험편에 적용되었다. 이때 내압은 고려되지 않았다. Fig. 2에는 배관에 적용된 4점굽힘시험의 개략도를 나타내었다. 4점굽힘의 부하스팬 길이는 245mm, 지지스팬 길이는 900mm로 하였다. 크로스헤드 변위속도 0.1mm/s로 변위제어를 실시하였다.

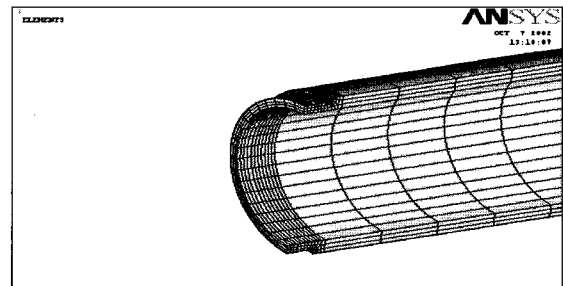
2.2 FE 해석

FEM에 의한 국부감육된 배관의 파괴거동 평가의 적용성을 확립하기 위해 탄소성(Elasto-plastic) 유한요소해석을 변위제어 하에서 긴 변형을 고려하여 실행하였다. 해석에는 범용 유한요소 Code인 ANSYS Ver. 7.0을 사용하였다. Fig. 3(a) 및 (b)에는 유한요소해석에 이용된 Mesh 모델링의 예를 나타내었다.

모델링에는 육면체 20절점요소와 사면체 10절점요소를 사용하였다. 배관의 대칭성을 고려하여 1/4모델을 해석에 이용하였다. Von Mises 항복조건과 등방경화칙을 적용하였다. 해석에는



(a) 1/4 model



(b) Detail of wall thinning

Fig. 3 An example of mesh of pipe with local wall thinning

Table 3 Geometries of pipe specimens with local wall thinning

Specimen No.	Half outer diameter R_s	Wall thickness t (mm)	Thinned depth d (mm)	Thinned ratio d/t	Thinned angle $2\theta(^{\circ})$	Thinned length $2C_A$ (mm)	Failure mode
(a) 360° all-circumferentially wall thinned specimen, [Fig. 1(a)]							
No. 1	51.0	8.1	3.0	0.370	360	25.0	Ovalization
No. 2	51.0	8.1	6.0	0.741	360	25.0	Buckling
No. 3	51.0	8.1	2.0	0.247	360	102.0	Ovalization
No. 4	51.0	8.1	3.0	0.370	360	102.0	Buckling
No. 5	51.0	8.1	6.0	0.741	360	102.0	Buckling
(b) Partially wall thinned specimen (identical depth), [Fig. 1(b); tension side]							
No. 6	51.0	8.1	4.0	0.494	46.1	25.0	Ovalization
(b) Partially wall thinned specimen (identical depth), [Fig. 1(b); compression side]							
No. 7	51.0	8.1	4.0	0.494	46.1	102.0	Buckling
(c) Both sides wall thinned specimen, [Fig. 1(c)]							
No.8	51.0	8.1	6.0	0.741	56.7	102.0	Ovalization
(d) Partially wall thinned specimen (different depth), [Fig. 1(d); compression side]							
No. 9	51.0	8.1	5.0	0.617	48.9	37.5	Buckling
(d) Partially wall thinned specimen (different depth), [Fig. 1(d); tension side]							
No. 10	51.0	8.1	5.0	0.617	48.9	37.5	Ovalization
No. 11	51.0	8.1	6.0	0.741	53.9	41.0	Crack initiation
No. 12	51.0	8.1	7.0	0.864	57.9	44.0	Crack initiation

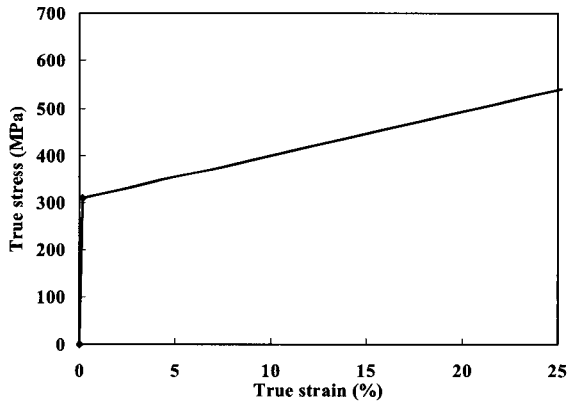


Fig. 4 Stress-strain curve for finite element analysis

진응력-진변형률의 관계가 적용되었고, 그것을 Fig. 4에 나타내었다. Young율, $E=206\text{GPa}$, Poisson비, $\nu=0.3$ 으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 손상모드

실험과 유한요소 해석에서 나타난 손상모드의 결과를 Table 3에 나타내었다. 본 실험에서 나타난 손상모드는 편평화(Ovalization), 국부좌굴(Local buckling), 균열발생(Crack initiation)으로 분류되었고 이들은 감육의 깊이, 형상, 위치에 의존하였다. FE해석에 있어서도 균열발생을 제외하곤 실험과

동일한 손상모드가 나타났다.

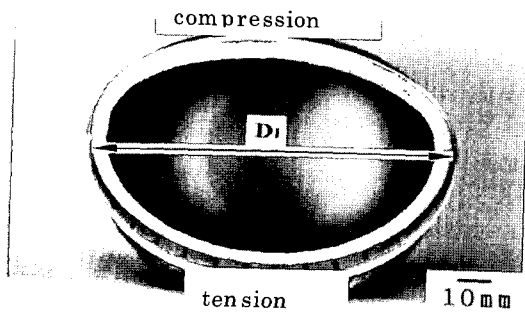
Fig. 5~8은 손상모드로서 좌굴과 편평화가 발생한 실험과 해석에 있어서의 모폴로지(Morphology)를 비교하여 나타내었다.

편평화파괴에 의해 발생한 배관의 편평화된 양상으로서 실험 종료 후 그 횡단면을 절단한 사진을 Fig. 5~6에 각각 나타내었다. 실험과 해석에 있어서 매우 유사한 결과를 나타내고 있다. Fig. 5는 360° 전주 감육의 결과이고, Fig. 6은 중립축 양측에 감육결합을 가공한 경우의 결과인데 편평화의 경우 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 속에 나타난 D1의 길이가 실험 전 원직경 보다도 더 길어져 있음을 확인할 수 있다.

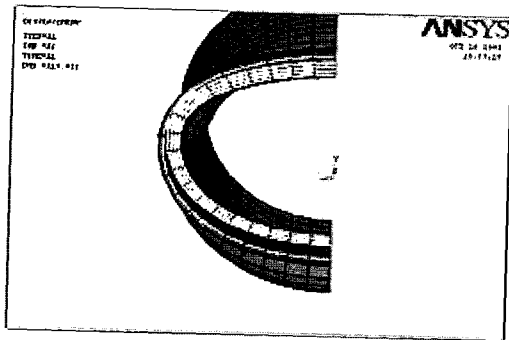
배관에 발생한 좌굴파괴의 양상을 Fig. 7~8에 나타내었다. 역시 실험과 해석이 매우 일치하는 결과를 보여주고 있다. 축방향으로의 감육 길이가 짧은 경우 감육 중앙부에서 상부로 부풀어 오르는 Wrinkle of elephant leg 타입의 좌굴이 발생하였는데 반해, 축방향으로의 감육 길이가 긴 경우에는 감육 중앙부가 함몰되는 듯한 Diamond 타입의 좌굴이 발생하였다. 이것으로부터 감육 길이에 따라 좌굴의 형태가 달라진다는 것을 알 수 있고, 감육 길이 또한 감육에 영향을 미치는 파라미터의 하나라는 것을 알 수 있다.

3.2 감육배관의 모멘트-변위 선도

실험 및 해석으로부터 구한 모멘트-변위($M-\delta$) 선도를 Fig. 9~11에 나타내었다. Fig. 9는 좌굴파괴의 경우, Fig. 10은 편평화파괴의 경우 및 Fig. 11은 균열발생의 경우이다. 그림 속의 선은 실험결과를, 부호(Symbol)는 해석결과를 각각 나타낸다.

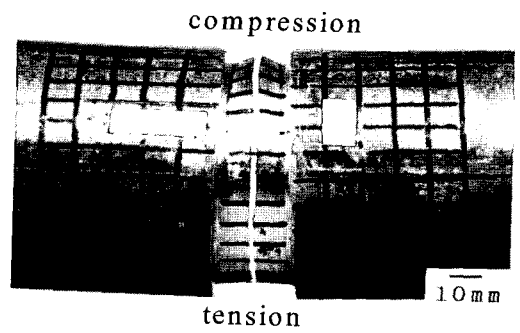


(a) Experiment

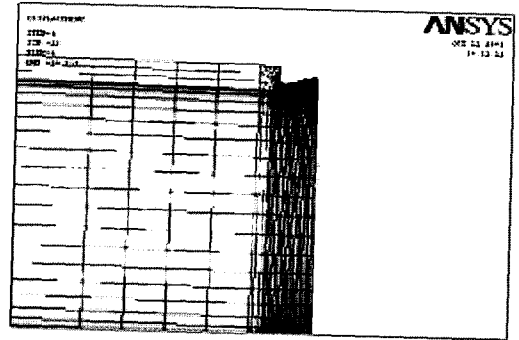


(b) Analysis by FEM (1/4 model)

Fig. 5 Shape of ovalization pipe (No. 1)

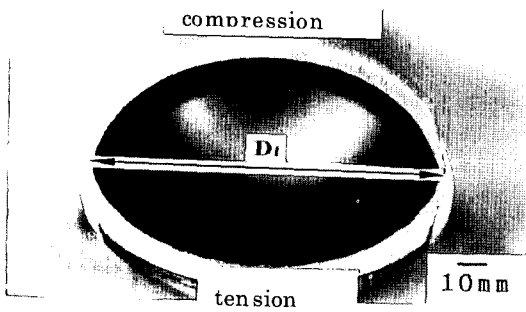


(a) Experiment

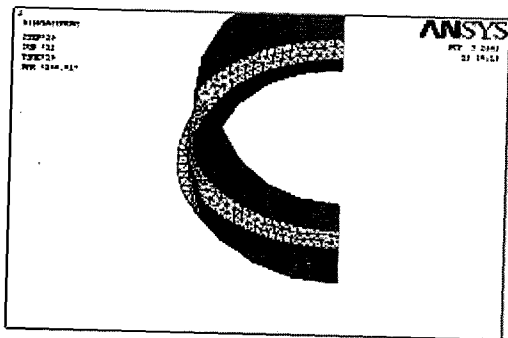


(b) Analysis by FEM (1/4 model)

Fig. 7 Shape of local buckling pipe (No. 2)

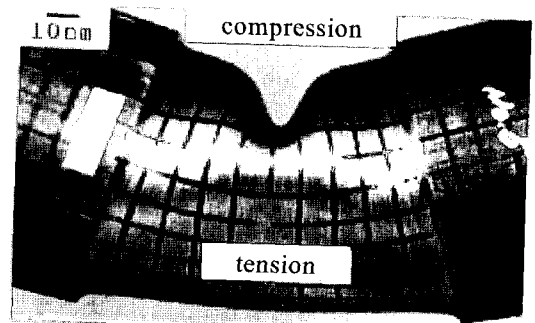


(a) Experiment

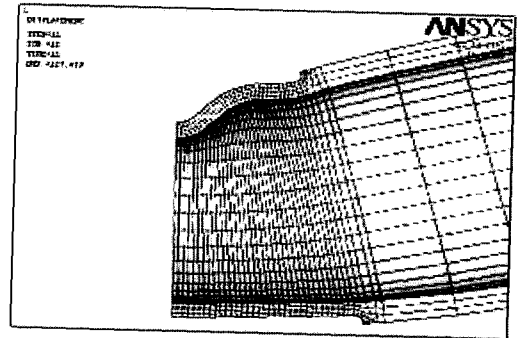


(b) Analysis by FEM (1/4 model)

Fig. 6 Shape of ovalization pipe (No. 8)



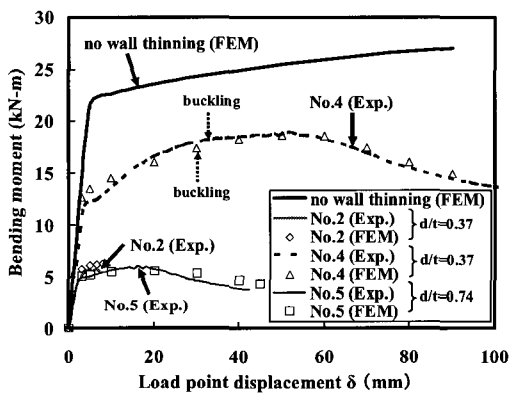
(a) Experiment



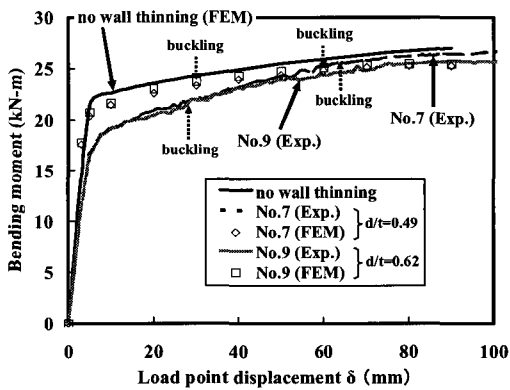
(b) Analysis by FEM (1/4 model)

Fig. 8 Shape of local buckling pipe (No. 4)

실험과 해석에 의한 결과를 비교하여 보면 각 변위에서의 모멘트값이 최대 약 15% 정도의 오차를 가지지만 유한요소 해석에 의해 실험의 결과가 잘 모의되고 있음을 알 수 있다. Fig. 9의 좌굴이 발생한 경우의 최대모멘트값은 건전배관에 비해 약 70%(No. 4), 25%(No. 5)정도 감소하였다. 단, Fig. (a)와 같은 360° 전주 감육의 경우 좌굴이 발생한 후 굽힘모멘트가 다소 상승하였고 이후 변위의 증가와 더불어 감소하였다. 이것은 감육부의 잔존 리가먼트(Ligament)가 유동응력에 달하기 전 이미 좌굴이 발생하였고 좌굴변형시 변형에너지의 변화가 약간의 모멘트 상승의 결과로 나타난 것으로 판단된다. 이후 유동응력에 달하여 변위의 증가와 함께 모멘트는 점차 감소하였다. 그러나 좌굴이 발생한 감육 길이가 긴 경우의 시험편은 충분한 연성을 나타내었다. 특히, 부분 감육을 가지는 Fig. 9(b)는 하중 부하방향에 대해서 압축측에 감육 결함을 위치시킨 경우로서 Fig. 9(a)의 인장 측에 위치시킨 경우에 있어서의 변위의 증가와 더불어 모멘트가 감소하는 경향에 비하여, Fig. 9(b)는 변위의 증가와 함께 모멘트가 증가하는 양상을

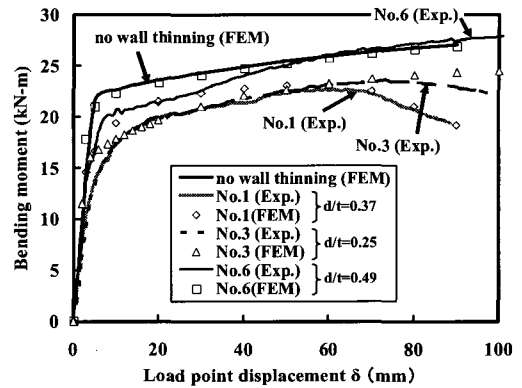


(a) 360° all-circumferential wall thinning

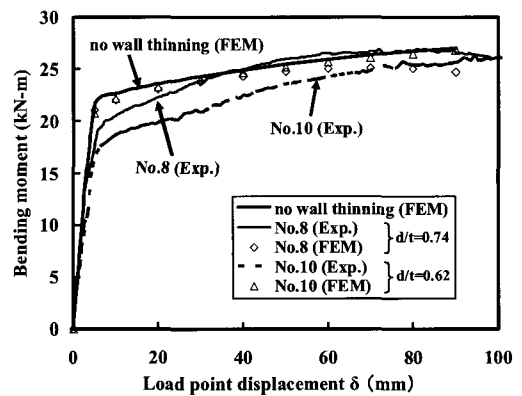


(b) Partial wall thinning (compressive side)

Fig. 9 Bending moment-load point displacement curve [the case of buckling]



(a) 360° all-circumferential and partial(tensile side) wall thinning



(b) Partial wall thinning (tensile side)

Fig. 10 Bending moment-load point displacement curve [the case of ovalization]

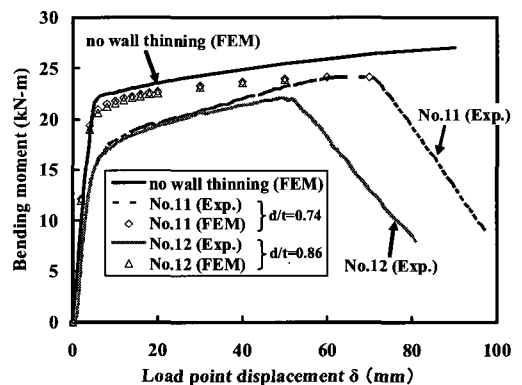


Fig. 11 Bending moment-load displacement curve [the case of crack initiation]

보이고 있고 건전한 배관의 모멘트와도 큰 차이를 보이지 않았다. 이것은 부하하중에 대해 압축축에 결함이 있는 경우에는 변형에 대한 구속이 커짐으로서 하중이증가하는 사실과 잘 일치한다.

Fig. 10은 편평화과피의 $M-\delta$ 선도로서 전주 감육 및 인장축에 부분 감육 결함이 있는 경우의 결과이다. 전주 감육인 No. 1과 No. 3에서 최대모멘트를 나타낸 후 변위의 증가와 더불어 모멘트가 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이에 반해 부분 감육인 No. 6, 8, 10의 경우에는 건전배관의 $M-\delta$ 선도와 유사한 경향을 나타내었다. 편평화과피가 발생하는 경우의 수는 감육 길이에 상관없이 감육비(감육깊이/공칭두께)가 작거나, 감육비가 다소 크더라도 부분 감육일 경우였다.

이에 반해, Fig. 11은 균열발생에 의해 배관이 파괴된 경우의 결과이다. Fig. 11의 No. 11과 No. 12는 각각 부분 감육을 가지고, 특히 감육 중앙부에서 가장 깊은 감육비(감육 길이방향으로 감육 깊이가 다르다)를 가지는 경우로서 부하방향에 대해 인장축에 감육 결함이 위치한 경우이다. 이 경우 배관에는 균열이 발생하였고 균열발생 후 하중이 급격히 저하하였다.

Fig. 10과 11의 No. 10, 11 및 12는 동일한 조건의 시험편들이지만 No. 11과 12는 No. 10에 비해 감육비, 감육 길이 및 감육 각도가 상대적으로 커서 균열이 발생하였다. 따라서 이상의 결과들로부터 감육 결함을 가지는 배관에 미치는 감육의 영향으로는 감육비, 감육 길이, 감육 각도 및 감육의 위치가 파라미터로 작용하는 것으로 판단된다.

3.3 최대모멘트의 비교 및 편평화율

Fig. 12는 실험과 해석으로부터 구한 최대모멘트의 비교를 나타낸 것이다. 실험과 해석의 결과들이 좋은 일치를 나타내어 FE해석이 높은 신뢰도를 가짐을 알 수 있고, 따라서 급힘하중하의 감육 배관의 파괴거동을 평가하기에 유용하다고 판단된다. 해석결과가 실험결과에 비해 다소 보수적으로 나타났다.

Fig. 13 및 14는 실험과 해석에서 구해진 변위에 대한 편평화율을 나타낸다. 편평화율은 아래 식 (1)로 정의하였다.

$$(D_1 - D_0) / D_0 \tag{1}$$

여기서, D_0 는 초기 배관 직경, D_1 은 편평화 후 배관의 길어진 직경(Fig. 5 및 6 참조)을 각각 나타낸다. Fig. 13은 편평화의 경우, Fig. 14는 좌굴 후 편평화의 경우(No. 7과 9)이다. 실험과 해석의 결과들이 좋은 일치를 나타내고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 단조급힘시험에 의한 감육을 가지는 배관의 파괴거동을 실험과 해석의 양면으로부터 평가하였으며, 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 감육을 가지는 직관에서 관찰된 손상모드는 국부좌굴, 편평화 및 균열발생으로 분류되었다. 이들은 감육비, 감육 길이,

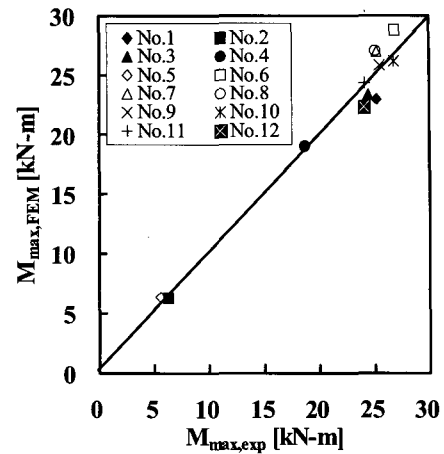


Fig. 12 Comparison between calculated and experimental maximum bending moment of local wall thinning pipe

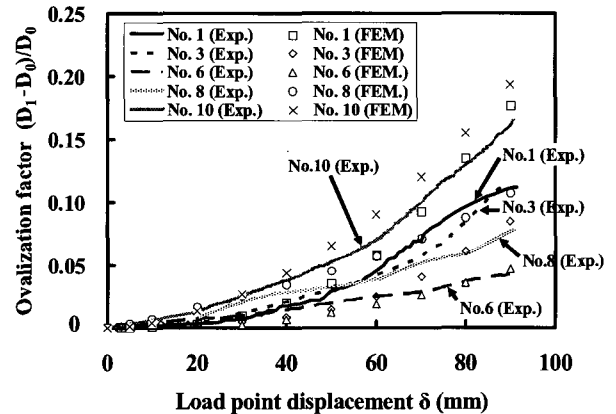


Fig. 13 Relation between load point displacement and ovalization factor [the case of ovalization]

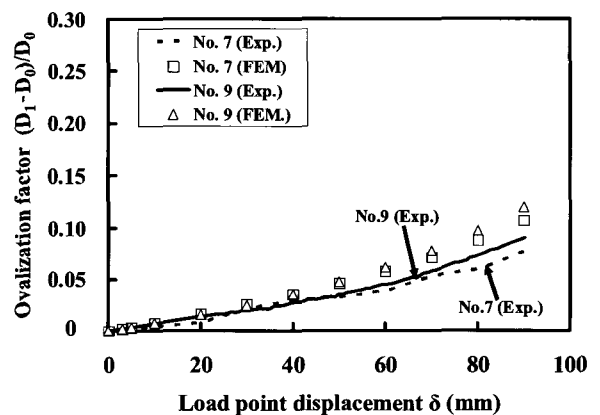


Fig. 14 Relation between load point displacement and ovalization factor [the case of ovalization after buckling]

감육 각도 및 감육 위치에 의해 영향을 받는다.

(2) 실험과 FE 해석의 비교에 있어서는 굽힘모멘트는 대략 15% 정도의 오차를 가지면서 FE해석에 의해 잘 묘사될 수 있음을 나타내었다. 그런 까닭으로 FE해석을 감육을 가지는 배관의 파괴거동을 평가하기 위한 수단으로 적절히 사용 가능한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 박인덕 (2002). "감육배관의 손상모드에 따른 음향방출 특성" 한국해양공학회지, 제16권, 제5호, pp 66-72.

Ahn, S. H., Ando, K., Ishiwata, M. and Hasegawa, K. (1998). "Plastic Collapse behavior of Pipes with Local Wall Thinning Subjected to bending Load Allowable Limit", JHPI, Vol 36, No 4, pp 225-234.

Ahn, S.H., Nam, K.W., Yoo, Y.S., Ando, K., Ji, S.H., Ishiwata, M. and Hasegawa, K. (2002). "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall

Thinning", Nuclear Engineering and Design Vol 211, pp 91-103.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III. (1992)

ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI. (1998)

Kim, J.W and Park, C.Y. (2002). "An Evaluation of Failure Behavior of Pipe with Local Wall Thinning by Pipe Experiment," KSME, Vol 26, No 4, pp 731-738.

Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S.H. and Ando, K. (1999). "Fracture behavior of Carbon Steel Pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load," Nuclear Engineering and Design 191, pp 195-204.

Son, B.G., Kim, Y.J. and Kim, Y.J. (2004). "Finite Element Based Stress Concentration Factors for Pipes with Local Wall Thinning," KSME, Vol 28, No 7, pp 1014-1020.

Virginia Electric and Power Co. (1987). "Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report".

2006년 4월 11일 원고 접수
 2006년 7월 11일 최종 수정본 채택